

大容量・長距離光ファイバ通信実現に向けた デジタルコヒーレント信号光の光ファイバ非線形伝送特性の検討

青木 恭弘

埼玉工業大学工学部情報システム学科

y-aoki@sit.ac.jp

Optical Fiber Nonlinear Propagation Characteristics of M-ary Digital Coherent Optical Signal for High-Capacity and Long-Haul Optical Communication Systems

Yasuhiro AOKI

Department of Information Systems, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

We have studied, through numerical simulation, long-haul fiber transmission performance over trans-oceanic distances of M-ary digital coherent optical signals such as DP-16 QAM up to a symbol rate of as high as 60 Gbps. Based on the results, feasibility of ultrafast optical fiber communication towards 1 Tbps (1,000 Gbps) capacity per channel has been discussed. Further, as one of the mitigation methodologies for fiber nonlinear impairment, fundamental study on the digital back propagation in a coherent optical receiver has been carried out as well as application of distributed Raman amplification for performance improvement towards much longer-distance and higher-capacity coherent optical communication systems.

Key Words: Fiber optics communication, Coherent communication, Nonlinear optics,
Digital signal processing, Optical fiber

1. はじめに

光ファイバを伝送媒体とする光ファイバ通信は、現在では国際通信から各家庭にまで普及し、データネットワークの根幹を担っている。この基幹伝送系は、近年、スマートフォン、IoT 機器などの通信機器の数の増大や機能の向上に伴い、急増するデータトラフィックを収容すべく、

大容量化・経済化が求められている。

この論文のテーマであるデジタルコヒーレント光ファイバ伝送方式は、コヒーレント検波と超高速デジタル信号処理（DSP）を組み合わせた最先端の光送受信技術であり、特に 2010 年以降において研究開発が活発に進められ、基幹伝送系の伝送容量および伝送距離の目覚ましい

進歩に大きく寄与してきた¹⁻⁵⁾。そして、最新のシステムでは、9,000 km の太平洋横断距離で 100 Gbps \times 100 チャンネル（ファイバペアあたり 10 Tb/s）の長距離伝送が、DP-QPSK (Dual Polarization, Quadruple Phase Shift Keying) 方式を使用して実用に供されている^{6,7)}。デジタルコヒーレント検波では、従来は困難であった長距離光ファイバ伝送時の波形歪みや非線形劣化の補償を DSP によってアダプティブに行える。この結果、受信感度および周波数利用効率をそれぞれの理論限界である量子雑音限界、シャノン限界近傍まで向上でき、究極の伝送性能を実現できる可能性があることが特長である。光ファイバ通信は、過去、光強度変調が主流であったため、“のろし通信”と揶揄されてきたが、今日では約 200 THz という高いキャリア周波数域で、位相および周波数を精細に制御・利用していることになる。

本小論では、筆者がこの数年にわたり埼玉工業大学で行ってきたデジタルコヒーレント信号光の光ファイバ非線形伝送特性に関する研究結果について述べる⁸⁻¹⁷⁾。特に、シンボルレート 30 Gbps の多値変調 (16 QAM : Quadrature Amplitude Modulation および 64 QAM) デジタル光伝送システムについて、超長距離光ファイバ伝送特性の諸システムパラメータ依存性をシミュレーションにより解析し、大容量太平洋横断システム実現のための条件を考究した。また、一つの搬送波あたり 1 Tbps (1,000 Gbps) レベルの超高速光ファイバ通信の実現性を探ることを目的として、将来技術と考えられるシンボルレート 60 Gbps での伝送特性を解析し、伝送性能を議論した。さらに、いくつかの伝送特性改善策の検討結果を示した。そして、この研究により、超高速デジタルコヒーレント光信号の光ファイバ非線形伝送特性を明らかにした。

なお、筆者による 2015 年頃までの大容量・長距離光ファイバ伝送技術に関する研究については、文献¹⁸⁾に解説しているので、併せて参照いただければ幸いである。また、無中継伝送に関する研究については、紙面の制約によりここでは触れないが、文献¹⁹⁾にまとめられてい

ることを付記する。

2. 光ファイバ伝送システムモデル

2-1. 光増幅中継伝送

光ファイバ通信は、光を搬送波として、数キロから 1 万キロメートル程度まで離れた場所に情報データを送信する。図 1 に、光増幅中継器を用いた長距離伝送システムの一般的な構成を示す。

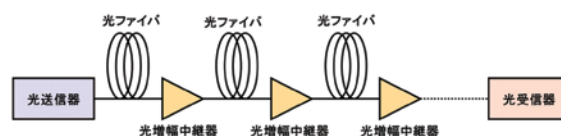


図 1 光増幅中継伝送システムの基本構成

この方式では、信号光を、レベル再生を繰り返しながら受信側まで伝送させるが、光ファイバの波長分散・非線形光学効果を介して、光ファイバ伝送路全体に渡って信号光同士、信号光・雑音間の相互作用が生じ伝送性能が制限を受ける。これを変復調方式、信号処理の工夫、伝送路構成要素の最適化などによって抑制・補償あるいは性能向上することによって、一層の大容量伝送を実現することが研究目的のひとつである。

2-2. デジタルコヒーレント光送受信

コヒーレント検波は、分類としては無線における同期検波と同じであり、1980 年代に研究が活発に行われていたが、光領域では位相および偏波の変動の影響のため実用化の目途が見えず、1990 年代の一時期は進展しなかった。一方、2005 年頃以降、大規模なデジタル信号処理が DSP によってリアルタイムに行えるようになり、デジタルコヒーレント検波方式として注目を集めるようになった²⁾。図 2 に、偏波多重デジタルコヒーレント光送受信器の基本構成を示す。光送信部では、I/Q 変調を行い、かつ X/Y 偏波多重を行う。一方、光受信部では、偏波ダイバーシティおよび位相ダイバーシティコヒーレント検波後に、DSP による高速演算処理によって偏波分離、分散補償、誤り訂正 (FEC)

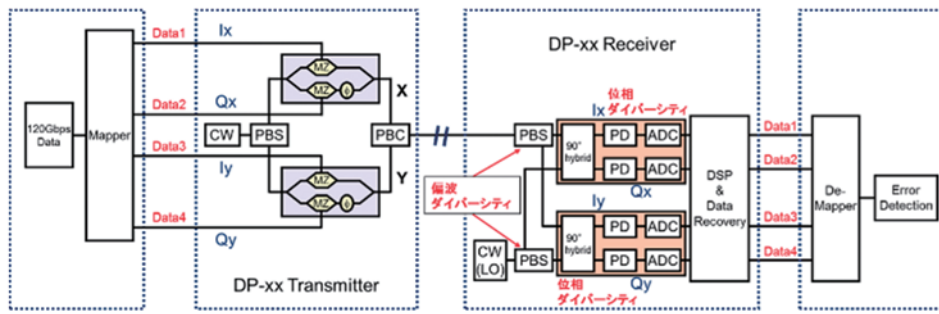


図2 偏波多重デジタルコヒーレント光送受信器の基本構成

などを行い、デジタル信号を復調する。I/Q 変調を多値（もしくは多元，M-Ary とも言う）化することにより，DP-xx（xx: QPSK, 16 QAM, 64 QAM など）変調が得られる。

2-3. 性能解析方法

デジタルコヒーレント光増幅中継伝送システムの伝送特性解析には，デジタルコヒーレント光送受信器の諸特性に加えて，光中継器から不可避免的に発生する ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光雑音や光ファイバ伝送に伴う損失，波長分散，偏波変動，3 次の非線形相互作用などを総合的に考慮する必要がある．この研究では，主に光通信システムシミュレータ (Optiwave 社，OptiSystem™) を用いて一連のプログラムを作成して性能解析を行った．この光通信シミュレータでは，例えば，光雑音による劣化は，光雑音を周波数軸上でスペクトル密度関数として与え，デジタル逆フーリエ変換により時間軸上での波形歪による符号干渉量として計算する．また，信号光の光ファイバ伝搬による波形変化は，非線形シュレディンガー方程式（より正確には，X/Y 偏波を取り入れており，マナコフ方程式と言う）をスプリットステップフーリエ法によって数値計算する．当初，このシミュレータを直接検波方式に適用した時は，実験結果との精密な定量的一致は見られなかった．一方，デジタルコヒーレント検波方式では，100 Gbps DP-QPSK 信号の 10,000 km 伝送特性の実験結果との比較検証¹⁰⁾ および Back-to-back 受信特性の量子雑音限界値との比較などにより，諸パラメータを適切に選択すれば，定量的にもよく合致した，極めて妥当と思われる結果が得

られることを確認している^{10,11,15)}．これは，コヒーレント検波方式では，同期検波を行っているため，受信信号光の光振幅と周波数・位相の情報が正確に再生されているためと考えられる．

3. システム解析結果と考察

3-1. DP-16 QAM ポスト 100 Gbps システム

DP-16 QAM および多値変調方式によれば，高密度波長多重により，より大容量な伝送が期待できるが，所要 OSNR が高くなるため非線形光学効果によって伝送距離が制限されることが予測される．ここでは，近い将来の数百 Gbps チャネル伝送に向けて，ビットレート 360 Gbps（データ 300 Gbps+20% FEC，下記参照）の DP-16 QAM，DWDM 光信号の超長距離伝送性能を検討した結果について述べる^{8,12)}．

まず，検討対象とした光増幅中継伝送システムの諸元を表 1 に示す．変復調方式は，DP-16

表 1 DP-16 QAM システム諸元

Items	System parameters
Modulation scheme	DP-16 QAM
Bit rate (Symbol rate)	360 Gb/s (45 Gbps Nyquist), 240 Gb/s (30 Gbps), 120 Gb/s (15 Gbps)
Repeater	Gain: 8 dB, Noise figure 4: dB
Transmission Distance Repeater Span	10,000 km (Max) 50 km
Transmission line fiber	Loss rate: 0.16 dB/km Dispersion: 20.5 ps/nm/km Aeff: 130 μm^2
Channel spacing	50 GHz

QAM を仮定し、ビットレートは 120 Gbps (シンボルレート 15 Gbps), 240 Gbps (シンボルレート 30 Gbps) および 360 Gbps (シンボルレート 45 Gbps) の 3 種類を比較検討した. このビットレートは, 誤り訂正用に 20% の冗長を考慮しており, 受信限界 Q 値は 6.7 dB を想定した⁶⁾. チャンネル間隔は 50 GHz を仮定, 360 Gbps の場合はナイキスト信号 ($\alpha = 0.01$) とした. 光多重分離の帯域は 45 GHz である. 伝送路は, スパン長 50 km の大口径 SMF を用い, 最長 10,000 km までのシステムを検討した.

図 3 に, 単一チャネル 360 Gbps DP-16 QAM 伝送波形 (コンステレーションマップ, X 偏波) を示す. 中継器出力 -6 dBm/ch では, 各シンボルは光雑音累積により伝送距離とともに広がるが, 中継器出力を増加すると, OSNR がそれに応じて増加するため, 各シンボルはより明

瞭になる. しかし, 0 dBm/ch 以上では, 非線形干渉雑音²⁰⁾ により, 各シンボルはより長い伝送距離で歪み始める. 他のビットレートでも同様な振る舞いであった.

図 4 は, 単一チャネル 360 Gbps 時の等価 Q 値の中継器出力依存性である. ここで, 等価 Q 値は, シンボル誤り率の代わりに, バイナリデータの誤り率 (BER) に置換して表した性能指標である. この図から, 等価 Q 値は, 中継器出力に関して最適な値 (360 Gbps では 0 dBm/ch) があり, その値は, 数千 km を超える長距離システムでは, 伝送距離にほとんど依存しないことがわかる. なお, 240 Gbps と 120 Gbps の最適中継器出力はそれぞれ約 -1.5 dBm と -3.0 dBm であった.

図 5 に, ビットレート 360 Gbps, 240 Gbps および 120 Gbps の最適チャネルパワーで伝送

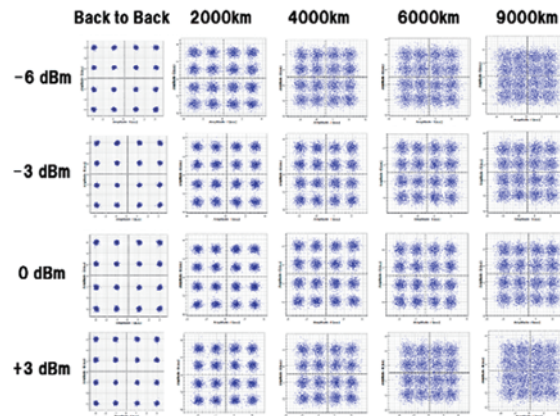


図 3 360 Gbps DP-16 QAM 伝送波形の距離および光中継器出力依存性

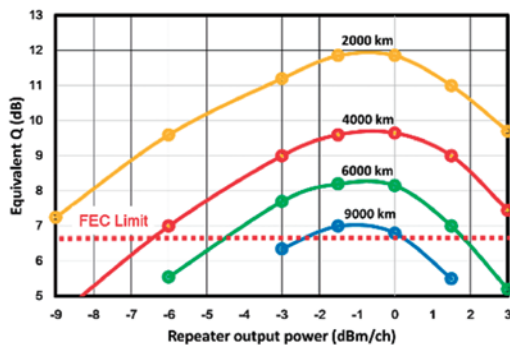


図 4 Q 値 (360 Gbps DP-16 QAM) の中継器出力依存性

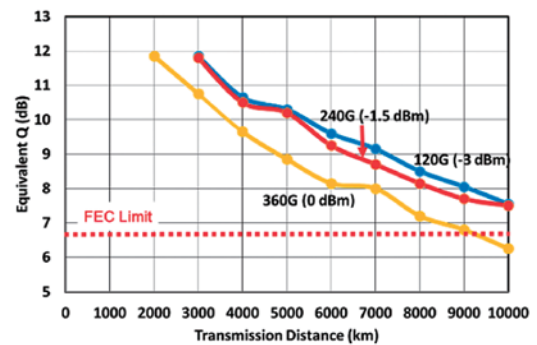


図 5 最適中継器出力での DP-16 QAM 信号の長距離伝送特性

したときの、等価Q値の伝送距離依存性を示す。ビットレート増加時のQ値の差は、360 Gbpsでは約1.3 dBであった。これは、受信帯域拡大によるSNR低下は、チャネルパワー増加（約3 dB）によって部分的に補償されるためと考えられる。また、同図より、動作マージンの課題があるが、360 Gbpsにおいても9,000 km程度の伝送の可能性があることがわかる。

3-2. Tbps 超高速システム

次に、一つの搬送波あたり1 Tbps (1,000 Gbps) レベルの超高速光ファイバ通信の実現性を探ることを目的として、シンボルレート60 GbpsでQPSK, 16 QAM, 64 QAM等のデジタルコヒーレント多値変調方式の光ファイバ伝送特性を数値解析した。ここで、シンボルレート60 Gbpsでは、DP-QPSK; 240 Gbps, DP-16 QAM; 480 Gbps, DP-64 QAM; 720 Gbps, DP-256 QAM; 960 Gbps)となる。また、ナイキスト波長多重を考慮し、Non-Nyquist (N-Nと表記)とNyquist (Nと表記)を比較検討した。

まず、図6に、非光ファイバ伝送（送受信器での直接折り返し構成、back-to-backと呼称）時における誤り率（BER）のOSNR依存性を示す。多値数が増加するとシンボル間距離が小

さくなるため、所要OSNRは大きくなることがわかる。また、多値数に応じて、64 QAM, 256 QAMについてはナイキスト化による過剰劣化が大きくなることがわかる。

図7に、表1記載の光増幅中継伝送路におけるナイキストDP-QPSK, 16 QAM, 64 QAM信号の伝送特性の伝送距離依存性の計算結果を示す。ここで、中継器出力は、最適値であるそれぞれ-2 dBm, +3 dBm, +5 dBmとした。同図より、多値変調では、最大伝送距離は制限され、9,000 kmまで信号を伝送可能なのはDP-QPSKのみとなる。したがって、明らかにDP-16 QAM以上では伝送特性を改善する必要がある。

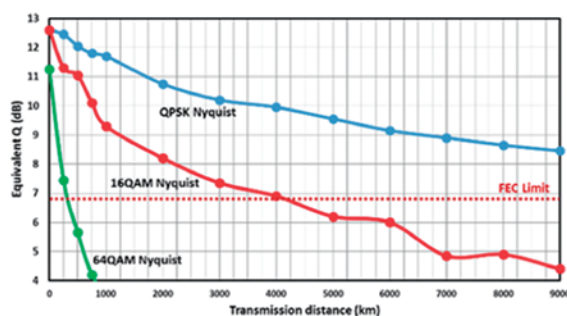


図7 シンボルレート60 Gbps多値変調伝送方式におけるQ値対伝送距離特性

3-3. 最大伝送可能距離

光ファイバ伝送システムの最大伝送可能距離は、チャネル数、チャネル波長間隔、中継スパン長、光中継器出力などに依存する。このため、実際のシステムにおいては、システム長に応じて最適設計することになる。筆者らは、システム設計ツールとして、数値シミュレーションに代わる、非線形干渉雑音モデルに基づく近似計算手法についても検討している^{11,15)}。

4. 光ファイバ伝送特性の改善

4-1. 非線形光学効果の補償

前節での検討結果から明らかなように、大容量・長距離伝送を実現するには光ファイバ伝送特性の改善策が重要となる。ここでは、その例として、非線形光学効果を補償するデジタルバックプロパゲーション技術、光ファイバパラ

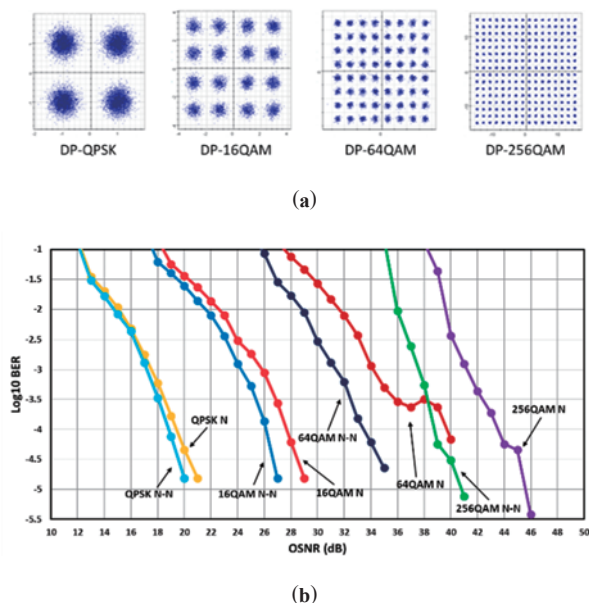


図6 (a) シンボルレート60 Gbps各変調方式の信号点配置図、(b) BER特性のOSNR依存性

ン増幅およびコンスタレーションシェイピングに関する検討について述べる。

4-2. デジタルバックプロパゲーション

デジタルコヒーレント光通信方式では、受信信号の振幅だけでなく周波数および位相情報を再生していることから、光ファイバ伝送に伴う線形な波形歪（すなわち、波長分散による波形歪）劣化のみならず、非線形光学効果による劣化を DSP により補償できる可能性がある。この非線形補償法のひとつとして、デジタルバックプロパゲーション (Digital Back Propagation, DBP) 法が、最近注目されている¹⁾。

ここでは、DBP の一つとして、受信器内非線形補償法を検討し、Q 値改善量を数値計算により明らかにした結果について述べる。

図 8 にデジタルコヒーレント光伝送システムの構成および受信器内 DBP 非線形補償法の基本動作原理を示す。コヒーレント検出方式の受信器では、受信信号光電流は局部発振光源との差周波検波によって線形にマッピングされる。この結果、光振幅に加えて周波数および位相の情報が再生される。これを利用して、受信器 DSP において、光増幅中継伝送路と構成が同じで、かつ、係数の符号が反転した仮想的な光増幅中継伝送路を構成して、その中を光信号を逆伝搬させれば、原理的には、線形な波長分散のみならず非線形光学効果による影響を補償できる。ただし、光増幅中継伝送に伴う ASE 雑音や受信器の回路雑音などの影響により、完全には補償できないことが報告されている²¹⁾。また、多チャネル伝送では、隣接チャネルの影響を補償する必要性が指摘されているが、ここでは単

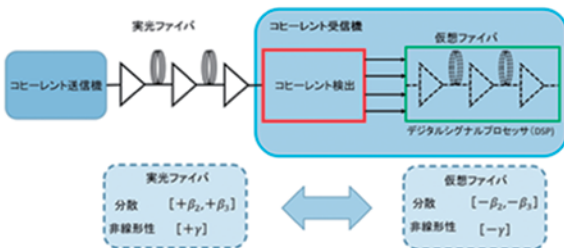


図 8 デジタルコヒーレント光増幅中継伝送システムにおける受信側デジタルバックプロパゲーション非線形補償の基本動作原理

一チャネル伝送の場合のみ検討した^{17,22)}。

計算では、表 1 記載の DP-16 QAM (240 Gbps) の伝送特性を解析した。まず、非線形補償を行わない場合の伝送特性を光中継器出力、光ファイバ伝送距離を変更しながら計算した。次に、非線形補償を適用し、補償有無による BER 改善量を求め、Q (dB) として表した。図 9 にその結果を示す。ここで、非線形補償のフィードバック係数 k は、最適値を求めた結果として $k = 0.7$ とした。これは、光増幅中継伝送路の非線形項の約 70% を負帰還したことに相当する²²⁾。

この図より、非線形補償を行うと、非線形劣化の一部が補償されるために、Q 値最大値が大きくなるとともに、中継器の最適出力値が高出力側（右側）にシフトすることがわかる。そして、DP-16 QAM 3,000 km および 5,000 km 伝送での Q 値改善量は、それぞれ、0.5 dB、0.75 dB であった。この値から、例えば、同一システム性能に換算した場合、システム長を 10%、16% 伸長できることになる。また、非線形雑音の抑制量を逆算すると、それぞれ 29.2%、40.4% と見積もられた。

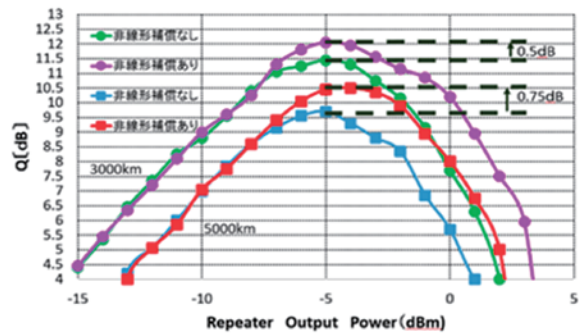


図 9 Q 値対中継器出力特性 (DP-16 QAM 3,000 km および 5,000 km 伝送)

4-3. 光ファイバラマン増幅

次に、現行の集中定数型 Er 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) に加えて、分布定数型の光ファイバラマン増幅 (FRA) を併用する光増幅中継伝送方式に注目し、EDFA/FRA 併用型光増幅中継器を用いたデジタルコヒーレント光伝送システムについて検討した¹⁴⁾。

図 10 に、光増幅中継伝送の 1 中継区間の構成を模式的に示す。FRA では、励起光の届く数 10 キロメートルの伝送路ファイバの中で分布的に光増幅されるため、EDFA 単独の場合に比べて光増幅中継器の出力を低くでき、この結果光ファイバ非線形効果による伝送制限を緩和できることが期待される。一方、FRA も雑音光を発生するので SNR 劣化や、励起光自身の強度雑音の影響による劣化などが予測される。

一例として、360 Gbps DP-16 QAM 方式について、EDFA/後方励起 FRA 併用システム（伝送距離：3,000 km，中継スパン：100 km）の伝送特性を解析した結果を図 11 に示す。この後方励起 FRA 併用時は、励起光の増加とともに向上し、600 mW 時には 1.5 dB 程度向上することがわかる。これは、後方励起により、光中継レベルが平坦化し、非線形劣化が抑制されたためと考えられる。なお、前方励起 FRA 併用の場合は、所要中継器出力は、励起光パワーの

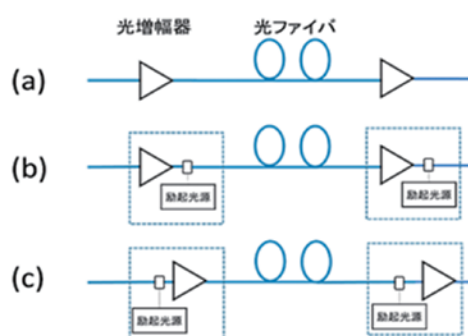


図10 光増幅中継伝送方式の比較. (a) 通常構成, (b) 前方励起 FRA 併用, (c) 後方励起 FRA 併用

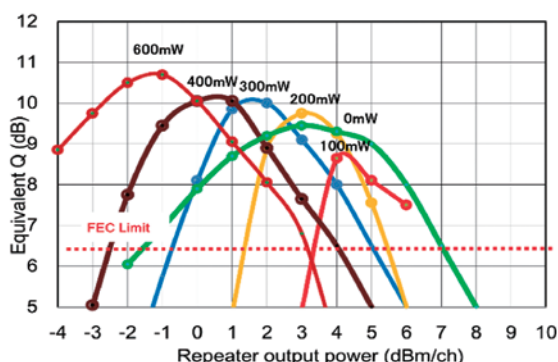


図11 後方励起 FRA 併用システムの伝送特性
(伝送距離 3,000 km, 中継スパン 100 km)

増加により減少するが、等価 Q 値はほとんど改善しなかった。

4-4. コンスタレーションシェイピング

最新のデジタルコヒーレント光伝送では、各シンボルの存在確率を最適化する Probabilistic Shaping (PS), 各シンボル間の距離を不等間隔・最適化する Geometric Shaping (GS) あるいは両者の組み合わせにより、伝送特性の向上が検討されている²³⁾。我々は、現在、DP-16 APSK と DP-16 QAM の比較検討など、GS による光ファイバ伝送特性の性能向上の可能性について研究を進めている¹⁶⁾。

5. まとめ

本論文では、筆者がこの数年にわたり埼玉工業大学で行ってきたデジタルコヒーレント信号光の光ファイバ非線形伝送特性に関する研究結果について述べた。この分野の技術進歩は目覚ましく、既に 400 GbE を超え 1.6 TbE などの議論が始まっている²⁴⁾。また、単に伝送容量を増やすのみではなく、ネットワーク管理などに人工知能導入の検討が行われている²⁵⁾。今後の光ファイバ伝送技術の進展に期待するとともに、引き続き、少しでも寄与したいと考えている。

謝 辞

ここで述べた内容は、およそ 2015 年から 2018 年の間に当研究室に所属された大学院生および学部生の協力により行った研究に基づいており、本研究活動に貢献された諸氏に改めて感謝いたします。

参考文献

- 1) Z. Xiang et al, ed. “Enabling Technology for High-Efficiency Optical Communication Network”, John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- 2) K. Kikuchi, J. Lightwave Tech., Vol.34, No.1, pp.157–179, 2016.
- 3) M. Nakazawa, K. Kikuchi and T. Miyazaki, ed., High Spectral Density Optical Communication Technologies, Springer, 2010.
- 4) 光ファイバ通信 [第 6 版] (オーム社), II 部,

- 2016 年.
- 5) 鈴木 他, 信学誌, Vol.95, No.12, pp.1100-1116, 2012.
 - 6) Y. Aoki, et al., IEEE Communications Magazine, Vol.50, No.2, pp.50-57, 2012.
 - 7) “FASTER cable system ready for service”, <http://www.capacitymedia.com/Article/3565973/FASTER-cable-system-ready-for-service>. Jun. 2016.
 - 8) Ahmed Algamidi, 埼玉工業大学 学位(修士)論文 (平成 30 年 1 月)
 - 9) 童 謙, 埼玉工業大学 学位(修士)論文 (平成 31 年 1 月)
 - 10) 後藤圭吾, 埼玉工業大学 情報システム学科 平成 28 年度卒業研究論文要旨集 p.14.
 - 11) 小池 匠, 同上要旨集 p.16.
 - 12) 新井大貴, 埼玉工業大学 情報システム学科 平成 29 年度卒業研究論文要旨集 p.14.
 - 13) 遠藤功貴, 同上要旨集 p.18.
 - 14) 鈴木 陸, 同上要旨集 p.17.
 - 15) 清水俊彰, 埼玉工業大学 情報システム学科 平成 30 年度卒業研究論文要旨集 p.24.
 - 16) 新井涼介, 同上要旨集 p.23.
 - 17) 柴 徹, 同上要旨集 p.22.
 - 18) 青木, 埼玉工業大学先端科学研究所アニュアルレポート No.14 (2016 年 3 月), pp.11-17.
 - 19) 張 鑫, 埼玉工業大学 学位(博士)論文 (平成 30 年 1 月).
 - 20) P. Poggiolini, J. Lightwave Tech., Vol.30, No.24, pp.3857-3879, 2012.
 - 21) Daniel Semrau, et al., ibid, Vol.36, No.3, pp.665-672, 2018.
 - 22) 青木 他, 第 17 回埼玉工業大学若手研究フォーラム (2019 年), pp.203-204.
 - 23) S. Zhang, et al., Opt. Communication, Vol.409, pp.7-12, 2018.
 - 24) J. Pedoro, et al., J. Opt. Com. and Network., Vol.12, No.2, pp.A123-A134, 2020.
 - 25) “An Introduction to Machine Learning Applications in Optical Transport Networks”, OSA Technical Group webinar Nov. 2020, <https://osa.zoom.us/recording/share/KJ3EULtweoNLF3yDiZAVRKayaZVYJi2rrvIsVpOEsNewIumekTziMw?startTime=157426185800>.